

Л. В. КИРЕНСКИЙ, И. Ф. ДЕГТЯРЕВ

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИСТОГО ЖЕЛЕЗА

Введение

В настоящее время известен ряд методов по исследованию домённой структуры. Наиболее распространенным методом является метод Акулова-Биттера, или метод порошковых фигур, представляющий широкие возможности для исследования при относительно невысоких температурах и небольших скоростях изменения магнитного поля и упругих напряжений.

Примененный Киренским и Дылгеровым метод киносъёмки порошковых фигур позволяет проводить исследования динамики домённой структуры при изменении магнитного поля [1].

Киносъёмка порошковых фигур была применена Киренским, Дылгеровым, Савченко [2], а также Шуром и его сотрудниками для исследования динамики домённой структуры при наложении упругих напряжений.

Однако при высоких температурах, а также при быстропеременных полях и быстропеременных напряжениях этот метод применен быть не может. Весьма перспективный электроннооптический метод, разработанный Г. В. Спиваком и его сотрудниками [3] для исследования динамики домённой структуры, пока не применялся. Метод пермаллового зонда, примененный Каузером [4], не дает столь ясной картины, как метод порошковых фигур.

Вероятно, отсутствием хорошо разработанного метода, пригодного для исследования домённой структуры при высоких температурах, следует объяснить тот факт, что вопрос о влиянии температуры на домённую структуру до последнего времени исследовался только в нескольких работах [5—8].

В настоящей работе описан метод наблюдения домённой структуры, который можно применить к исследованию температурной зависимости домённой структуры в ферромагнитных материалах вплоть до точки Кюри. В основу метода положен магнитооптический эффект Керра.

Различают три вида магнитооптического эффекта Керра:

1. Полярный эффект, когда вектор намагниченности направлен нормально к поверхности ферромагнитного зеркала.
2. Меридиональный эффект, когда вектор намагниченности находится в плоскости образца и в плоскости падения поляризованного света.

3. Экваториальный эффект, когда вектор намагниченности находится в плоскости образца, но нормален к плоскости падения света.

В случае полярного эффекта вращение плоскости поляризации при нормальном падении света максимально и достаточно большое для того, чтобы наблюдать доменную структуру на базовой плоскости таких монокристаллов, как кобальт и сплав $MnBi$, с помощью обычного металлографического микроскопа [6].

Для наблюдения доменной структуры на плоскостях, где нет нормальной составляющей вектора намагниченности, можно воспользоваться меридиональным эффектом Керра. При использовании этого эффекта встречается ряд существенных технических трудностей, главная из которых заключается в том, что угол, на который поворачивается плоскость поляризации очень мал и максимальное его значение для железа достигает около $5'$. Ввиду этого до сих пор не удавалось надежно наблюдать домены не только визуально, но даже на фотографиях, так как микрорельеф поверхности образца давал значительно большую разность интенсивностей от различных участков, чем от соседних доменов.

Впервые эта трудность фотографирования до некоторой степени была преодолена следующим образом: исследуемый участок ферромагнитного образца фотографировался в состоянии магнитного насыщения. На полученном негативе отражалось действие только микрорельефа поверхности. Из негатива изготовлялся прозрачный позитив, который точно совмещался с негативами, снятыми с того же участка образца в исследуемом состоянии. После такого наложения значительно снижалось действие микрорельефа поверхности и выявлялись домены в виде темных и светлых полос.

Первоначально и нами был использован полностью этот метод, для чего был изготовлен специальный прибор, позволяющий точно совмещать прозрачный позитив с негативами.

Но как оказалось, для решения поставленной задачи этот метод не может быть использован, так как при нагревании образца до 600° — $700^{\circ}C$ происходит изменение микрорельефа поверхности и эффект совмещения значительно снижается. Кроме того, метод, при котором отсутствует возможность визуального наблюдения и непосредственного фотографирования, следует считать малоперспективным для исследования динамики доменной структуры даже при комнатной температуре.

Для решения поставленной задачи магнитооптический метод с использованием меридионального эффекта Керра был значительно изменен. Изменение заключалось в основном в методике обработки исследуемой поверхности ферромагнитного образца.

Для этого был использован эффект усиления керровского вращения плоскости поляризации при покрытии отражающей поверхности ферромагнитного зеркала тонкой пленкой диэлектрика или полупроводника. Это явление подробно исследовалось для случая полярного эффекта Носковым и Соколовым [11].

Как было проверено в настоящей работе, тонкие пленки диэлектрика, нанесенные на поверхность ферромагнитного зеркала, в значительной мере усиливают вращение плоскости поляризации, так же и в случае меридионального эффекта Керра.

Среди различных пленок, которыми можно покрывать поверхность исследуемого образца, наиболее подходящей оказалась пленка окиси железа. Главное ее преимущество перед другими заключается в том, что при соответствующей толщине она дает аномально большое отри-

цательное вращение плоскости поляризации, которое не описывается законом Френкеля.

Причину усиления поворота плоскости поляризации в общих чертах можно объяснить как результат интерференции поляризованного луча, отраженного от поверхности пленки и не испытывшего вращения, с лучом, отраженным от границы «образец — пленка», который испытал поворот плоскости поляризации.

Кроме того, вследствие прохождения луча в пленке между первым и вторым лучами могла возникнуть разность фаз и интенсивностей.

Экспериментальная часть

Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Свет от источника S при помощи линзы L_1 превращался в параллельный пучок и поляризатором P поляризовался в плоскости, перпендикулярной к плоскости падения лучей на поверхность исследуемого образца K .

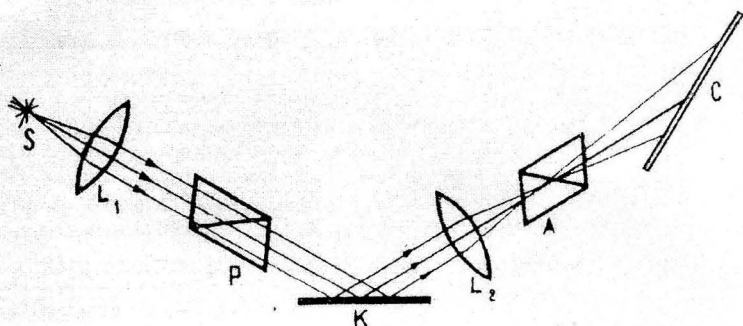


Рис. 1. Схема установки для наблюдения доменной структуры с помощью меридионального эффекта Керра.

После отражения света от образца при помощи линзы L_2 получалось изображение поверхности на фотопленке C .

Анализатор A размещался за линзой L_2 так, чтобы через его центр проходила фокальная плоскость линзы. Угол падения лучей на поверхность образца можно было изменять от 20° до 90° .

Для визуального наблюдения на место фотокамеры помещался окуляр. Перед фотографированием поляризатор и анализатор устанавливались на минимум прохождения света, а затем анализатор поворачивался на небольшой угол, и при визуальном наблюдении через окуляр отчетливо выделялись домены в виде темных и светлых полос.

Так как этот метод безынерционный, то, используя стробоскопический эффект, удастся наблюдать процесс смещения границ в переменных полях с частотой в 50 гц и выше.

Также оказалось возможным производить исследование доменной структуры в весьма широком интервале температур. Для этого образец K вместе с нагревателем H помещался в камеру, в которой создавался вакуум (рис. 2). Камера имела два отверстия, которые закрывались плоскими стеклами и располагались нормально к падающим и отраженным лучам. Нагреватель закреплялся в фарфоровой трубке D так, чтобы при изменении температуры не произошло смещение образца. Температура измерялась с помощью термопары нихром-константан.

При температурах свыше 500°C возникало свечение образца, но при

экспозициях до 10—15 сек. это собственное излучение не оказывало существенного действия на фотопленку вплоть до 700°C.

Для наблюдения изменения доменной структуры с изменением поля применялись катушки Гельмгольца.

Исследования проводились на монокристаллах трехпроцентного кремнистого железа, вырезанного в виде полосок $25 \times 4 \times 0,3$ мм в плоскости (110).

Образцы, приготовленные также, как и для наблюдения порошковых фигур, отжигались в вакууме порядка 10^{-3} мм рт. ст. при температуре 1000°C в течение 3 часов.

После остывания до 400°—500°C в вакуумную трубку впускался воздух. Это делалось для того, чтобы образцы покрылись устойчивой к повторному нагреванию пленкой окиси железа. При соответствующей толщине пленки создавалась возможность визуального наблюдения доменной структуры.

На рис. 3 представлены фотографии, иллюстрирующие изменения доменной структуры при наложении усиливающегося магнитного поля. Расширение наиболее выгодно ориентированных в отношении поля доменов за счет менее выгодно ориентированных убеждает в том, что как сама доменная структура, так и ее изменение с полем, фиксируются достаточно надежно.

Исследования на других образцах показали, что на данной установке при фотографировании

Рис. 2. Схема прибора для исследования доменной структуры при различных температурах.

достаточно отчетливо выявляются домены шириной в 0,01 мм и выше.

На рис. 4 представлены снимки доменной структуры в отсутствие магнитного поля при различных температурах от 20° до 700°C.

Как видно из приведенного рисунка, доменная структура кремнистого железа отличается высокой температурной стабильностью. Действительно, ширина полос доменов сохраняется в указанном интервале температур постоянной. При температурах выше 500°C заметно уменьшается контраст между соседними доменами, что в основном является результатом уменьшения спонтанной намагниченности.

Выводы

1. Использование пленки окиси железа при исследовании доменной структуры ферромагнетиков методом меридионального эффекта Керра позволяет проводить визуальные наблюдения доменной структуры, а также осуществлять их фото- и киносъемку.

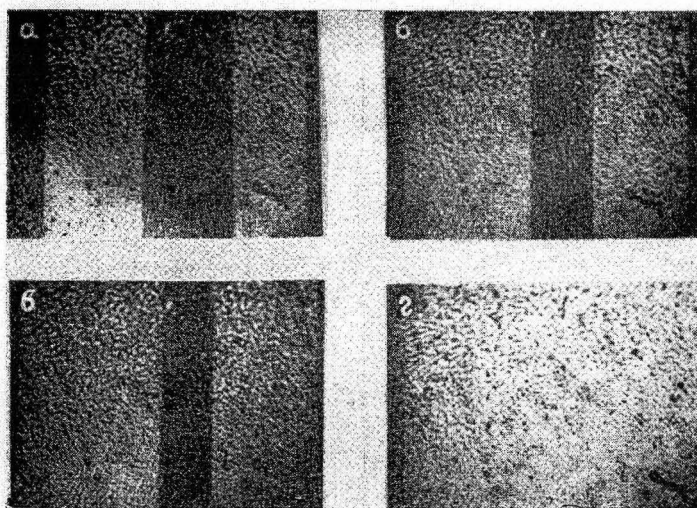


Рис. 3. Изменение доменной структуры при наложении поля.
 а — $H = 0$, б — $H = 15$, в — $H = 25$, г — $H = 60$ э.

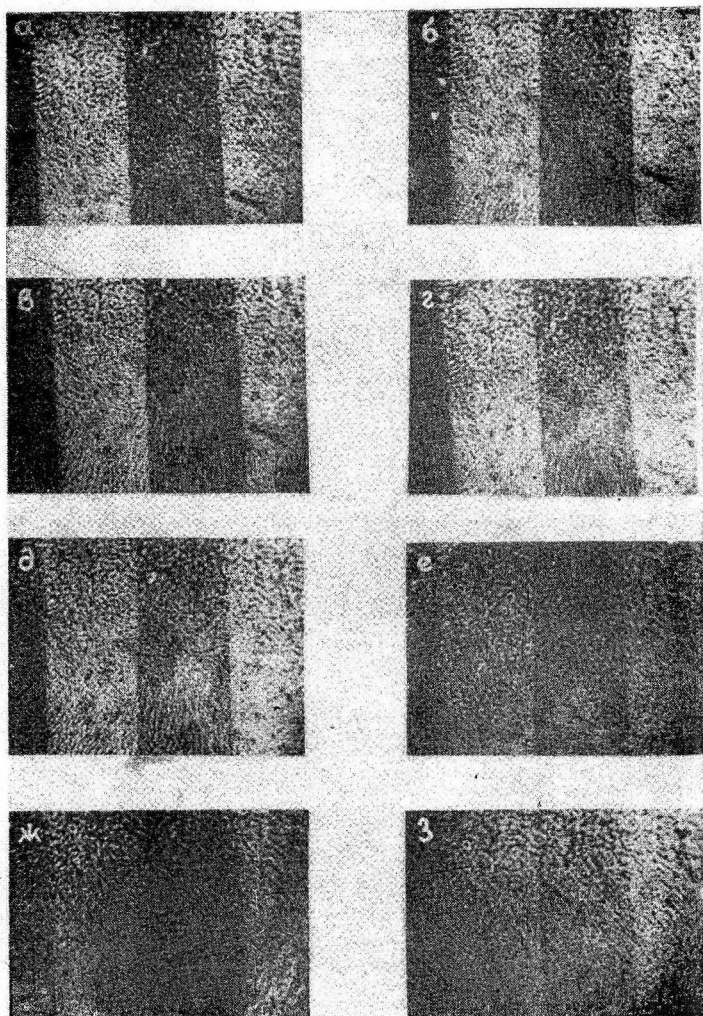


Рис. 4. Доменная структура кристаллов кремнистого железа в плоскости (110) при различных температурах, $H = 0$.
 а — $t = 20^\circ\text{C}$, б — $t = 100^\circ\text{C}$, в — $t = 200^\circ\text{C}$, г — $t = 300^\circ\text{C}$, д — $t = 400^\circ\text{C}$,
 е — $t = 500^\circ\text{C}$, ж — $t = 680^\circ\text{C}$ з — $t = 700^\circ\text{C}$.

2. Вследствие безынерционности метод магнитооптического эффекта Керра позволяет проводить исследования при значительных скоростях изменения магнитного поля и упругих напряжений.

3. Магнитооптический эффект Керра позволяет проводить исследования в широком интервале температур.

4. Доменная структура кремнистого железа в плоскости (110) отличается высокой температурной стабильностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Киренский, В. Д. Дылгеров. ФММ, 3, вып. 2, 216, 1956.
2. Л. В. Киренский, В. Д. Дылгеров и М. К. Савченко. Изв. АН СССР, сер. физ., т. XXI, № 8, 1168, 1957.
3. Г. В. Спивак, Н. Г. Канавина, И. С. Сбитникова и Т. Н. Домбровская. ДАН, 105, № 4, 706, 1955.
4. J. Kaczer. Czechosl. j. Phys., 5, 239, 1955.
5. B. Elschner. Ann. Phys., 13, 290, 1953.
6. W. Andrä. Ann. Phys., 17, 78, 1956.
7. W. Andrä. Ann. Phys., 17, 233, 1956.
8. Я. Кацзер. Изв. АН СССР, сер. физ., XXI, № 8, 1170, 1957.
9. C. Fowler and E. Fryer. Phys. Rev., 94, 1, 52, 1954.
10. B. Roberts and C. Bean. Phys. Rev., 94, 1494, 1954.
11. М. М. Носков, А. В. Соколов. ЖЭТФ, 17, вып. 11, 969, 1947.

*Институт физики СО АН СССР
г. Красноярск*